REGIONES TÉRMICAS ÓPTIMAS Y MARGINALES PARA EL CULTIVO DE *Agave tequilana* EN EL ESTADO DE JALISCO

OPTIMAL AND MARGINAL THERMAL REGIONS FOR THE CULTIVATION OF *Agave tequilana* ON THE JALISCO STATE

José A. **Ruiz-Corral**[1], Eulogio **Pimienta-Barrios**[2] y Julia **Zañudo-Hernández**[2]

[1]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. CIRPAC. Parque Los Colomos. Guadalajara, Jalisco. [2]Departamento de Ecología. CUCBA-Universidad de Guadalajara. Km 15.5 Carretera Guadalajara-Nogales. 45110. Las Agujas, Nextipac, Zapopan, Jalisco. Tel. y Fax: 36-820-076. (epimient@maiz.cucba.udg.mx)

Resumen

El agave azul (*Agave tequilana* Weber) se ha convertido en un cultivo importante en el Estado de Jalisco, México, debido al incremento en la demanda de tequila. Sin embargo, la superficie cultivada ha disminuido durante los últimos cuatro años, debido al daño causado por plagas y enfermedades. Recientemente se han establecido nuevas plantaciones en diferentes localidades de Jalisco, algunas de las cuales presentan condiciones climáticas diferentes de las regiones tradicionales del cultivo. Con el fin de contribuir a ordenar la planificación del cultivo de *A. tequilana*, se realizó un estudio de la respuesta fotosintética estacional en plantaciones ubicadas en Amatitán y en Arandas, Jalisco, ubicadas en las regiones más importantes de cultivo de *A. tequilana*. Las localidades experimentales presentan diferencias en la temperatura promedio anual, debido a que Amatitán y Arandas se localizan a 1000 y 2000 m de altura. La fotosíntesis se incrementó por temperaturas promedio frescas diurnas (22-25 °C) y nocturnas (14-16 °C), pero disminuyó por temperaturas promedio cálidas durante el día (>28 °C) y la noche (>20 °C). La respuesta de la fotosíntesis a la temperatura se empleó para definir intervalos térmicos de estratificación, que incluyen promedios anuales de temperatura nocturna y diurna. También se determinó la probabilidad de ocurrencia de temperaturas menores o iguales a −7 °C en Jalisco. Con estos intervalos se identificaron áreas donde se reducen los riesgos causados por bajas temperaturas y áreas favorables para la actividad fotosintética en *A. tequilana*. Con esta información se elaboró un mapa de Jalisco en el cual se localizan las áreas térmicas optimas y marginales para el cultivo de *A. tequilana*. Las áreas óptimas están en el norte, noreste y la parte central de Jalisco; las marginales, en la región denominada Los Altos, las planicies costeras y en cañones y barrancas del Estado.

Palabras clave: *Agave tequilana*, fotosíntesis, temperatura, regiones de cultivo.

Abstract

Because of the increase of the demand for the beverage known as tequila, agave azul (*Agave tequilana* Weber) has become an important crop for the State of Jalisco. Notwithstanding this demand, cultivation areas have been reduced during the last four years, because of the damage caused by pests and diseases. Recently, new plantations have been established in different localities of Jalisco. Some of these new localities, however, have climatic conditions that differ from the traditional sites of cultivation. With the purpose of directing the future cultivation of *Agave tequilana*, an examination of the photosynthetic response to seasonal changes was realized in plantations in Amatitán and Arandas, Jalisco. These plantations are located in two of the most important cultivation regions for *A. tequilana*. The Amatitán and Arandas plantations have different average annual temperatures, since they are located at altitudes of 1000 m and 2000 m. Photosynthesis increased with fresh average diurnal temperatures (22-25 °C) and fresh night temperatures (14-16 °C), but decreased with warm temperatures during the day (>28 °C) and night (>20 °C). Photosynthetic response to temperature was used to define the thermal stratification ranges that include average annual nocturnal and diurnal temperature. The probability of temperatures less or equal than −7 °C occurring in Jalisco was also determined. Thermal ranges were used to identify regions with reduced risks caused by low temperatures, and regions with temperatures favorable for photosynthesis for *A. tequilana*. A map of Jalisco was developed, in which the optimal and marginal areas for the cultivation of *A. tequilana* were identified. The optimal thermal areas for the cultivation of *A. tequilana* are located in the north, northeast and central parts of Jalisco, the marginal areas in the region called Los Altos, the coastal plains, and inland canyons.

Key words: *Agave tequilana*, photosynthesis, temperature, cultivation regions.

Introduction

Agave azul (*Agave tequilana* Weber) has become an important crop for the State of Jalisco since 1995, because of the increased demand for

Recibido: Marzo, 2001. Aprobado: Enero, 2002.
Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 36: 41-53. 2002.

Introducción

El agave azul (*Agave tequilana* Weber) es un cultivo importante en Jalisco desde 1995 debido a la creciente demanda de tequila que se derivó de la denominación de origen al tequila acompañada por la certificación de calidad, la promoción en los mercados internacionales por el Consejo Regulador del Tequila (CRT) y la proliferación de nuevas empresas. Este incremento en la demanda del tequila fue paralelo a la disminución en la superficie cultivada del agave: de 1990 a 1997 la superficie aumentó de 50 000 a 62 000 ha, pero después de 1997 se redujo en 26.5% y en 2000 a 45 000 ha. Esta disminución se atribuye a diferentes causas: el bajo precio de las piñas durante 1996-1998 (CRT, 2000); los daños causados por el picudo del agave *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal, el piojo harinoso *Pseudococcus* sp., el gusano blanco *Acentrocneme* (*Aegiale*) *hesperiaris* (Wlk.), la marchitez causada por *Fusarium oxysporum*; y la pudrición del cogollo causada por *Erwinia* sp. (Flores, 2000). El CRT considera que para satisfacer la demanda actual es necesario incrementar la superficie de cultivo a 100 000 ha.

Por tanto, hay interés por establecer nuevas plantaciones; algunas se han situado en las zonas tradicionales de cultivo, pero otras se ubicaron en nuevos ambientes más cálidos o más fríos que aquellas regiones. La temperatura puede influir en los procesos fisiológicos básicos, como fotosíntesis y respiración, que determinan en gran parte la cantidad de los azúcares que se forman en las hojas y posteriormente se transportan y almacenan en la piña. Trabajos previos en especies que presentan el metabolismo del ácido crasuláceo (MAC), como en *A. tequilana*, *Opuntia ficus-indica* y *Stenocereus queretaronesis*, han revelado que temperaturas cálidas reducen la fotosíntesis e incrementan la respiración (Nobel *et al*., 1998; Pimienta-Barrios *et al*., 2000). También se ha encontrado que *A. tequilana* es una planta sensible al daño por temperaturas bajas (−7 °C) (Nobel *et al*., 1998).

Este trabajo tuvo como objetivo delimitar las áreas térmicas óptimas y marginales para el cultivo de *A. tequilana*, usando información climática de las principales regiones de Jalisco y la respuesta fisiológica de esta planta a la temperatura, luz y humedad del suelo obtenida a través de estudios ecofisiológicos en plantaciones ubicadas en las principales regiones productoras de *A. tequilana* en Jalisco.

Materiales y Métodos

Descripción climática de las áreas productoras de agave

Las zonas productoras de *A. tequilana* más importantes están en las regiones de Los Altos, Zona Centro y Tequila. La región de Los

tequila, brought about by the official recognition of the origin of tequila and the certification of quality, and, furthermore, its promotion on international markets by the Consejo Regulador del Tequila (CRT), and the proliferation of new companies producing the beverage. However, the increased demand of tequila was accompanied by a drastic reduction in the area dedicated to agave cultivation. For example, from 1990 to 1997 the cultivated land increased from 50 000 to 62 000 ha. After 1997, it was reduced by 26.5%, and in the year 2000, to 45 000 ha. This reduction resulted from different causes: The low price of boles from 1996 to 1998 (CRT, 2000); the damage caused by pests and diseases such as agave weevil *Scyphophorus acupunctatus* Gyllenhal, powdery louse *Pseudococcus* sp., white worm *Acentrocneme* (*Aegiale*) *hesperiaris* (Wlk.), wilting caused by *Fusarium oxysporum*; and the heart rot caused by *Erwinia* sp. (Flores, 2000). CRT predictions consider that the cultivated land of *A. tequilana* should increase to 100 000 ha in order to satisfy the present industrial demand. Therefore, there is an increasing interest in establishing new plantations. Some of them have been located in the traditional cultivation zones, while others have been established in warmer or cooler environments than the traditional ones. The differences in temperature prevailing in the new cultivation areas, might affect basic physiological processes such as photosynthesis and respiration, which greatly determine the amount of sugars produced by the leaves and are latter transported to the crown, where sugars are stored. Previous works on succulent plants, that present crassulacean acid metabolism (CAM), as *A. tequilana*, *Opuntia ficus-indica* and *Stenocereus queretaronensis*, revealed that high temperatures reduce photosynthesis and increase respiration (Nobel *et al*., 1998; Pimienta-Barrios *et al*., 2000). It also was found that *A. tequilana* is a plant susceptible to low temperature damages (−7 °C) (Nobel *et al*., 1998).

The main objective of this study was to delimit the optimal, sub-optimal, and marginal thermal areas for the cultivation of *A. tequilana* by using climatic information obtained from the main regions of the state of Jalisco, and the physiological response of this plant to temperature, light and soil humidity, obtained through eco-physiological studies conducted in the most important producing regions in Jalisco.

Materials and Methods

Climatic description of the agave production areas

The most important cultivation areas of *A. tequilana* are located in the geographic regions named Los Altos, Central zone and Tequila. Los Altos region has an altitude that varies from 1900 to 2350 m. The

Altos se encuentra a una altitud que varía de 1900 a 2350 m; la temperatura promedio anual nocturna oscila entre 9 y 17 °C y la diurna entre 21 y 27 °C, y la precipitación pluvial varía de 705 a 870 mm (INEGI, 1992; Medina *et al.,* 1998). En la región Centro se encuentra el municipio de Amatitán, el único importante en la producción de agave azul, el cual está conectado con la región de Tequila formando prácticamente una sola zona. El clima en estas regiones es similar y más cálido que en la región de Los Altos; presenta una mayor variación de altitud (470 a 2830 m) la cual se refleja en mayores variaciones térmicas, ya que la temperatura promedio anual nocturna va de 11 a 22 °C, con una media de 17 °C, y una diurna de 22 a 32 °C con un promedio de 27 °C. La precipitación acumulada anual varía de 830 a 1050 mm (INEGI, 1992; Medina *et al.,* 1998).

Estudio ecofisiológico

Este estudio se llevó a cabo desde septiembre de 1998 hasta agosto de 1999, en dos plantaciones comerciales de agave azul (*Agave tequilana* Weber var. azul) en Jalisco, México. La primera se localiza en Amatitán (AMAJ) a 20° 42' 30" N, 103° 37'40" O y 1310 m, con clima subtropical cálido (Medina *et al*., 1998), y la segunda en Arandas (ARAJ) a 20° 36' 30" N, 102° 00'45" O y 2000 m, con clima subtropical templado (Medina *et al*., 1998). En cada plantación se seleccionó un bloque de 50 plantas de cinco años, y en cada fecha de medición se eligieron al azar 10 plantas de esta población para medir asimilación neta de CO_2 cada 2 h durante 24 h. Se llevaron a cabo seis mediciones de fotosíntesis en cada plantación (septiembre, 1998; noviembre, 1998; enero, 1999; marzo, 1999; junio, 1999; y agosto 1999). Se empleó un aparato portátil para medir fotosíntesis Li-Cor LI-6200 (Li-Cor Lincoln, NE, EE.UU), cuya cámara de medición de 250 cm^3 fue modificada para registrar el intercambio de gases en una superficie laminar suculenta, como es el caso de las hojas de *A. tequilana*. Esta modificación requirió el reemplazo de la cubierta semicilíndrica, dejando la parte de la cámara en forma de prisma con base rectangular, la que fue cubierta con una mica de plástico, dejando en un extremo una pequeña abertura rectangular de 6 cm^2 (2 cm x 3 cm) cuyos bordes se cubrieron con hule-espuma (Pimienta-Barrios *et al*., 2000). Esta apertura se puso en contacto con la epidermis superior de la parte media de la hoja de *A. tequilana* para registrar el intercambio de CO_2 entre la hoja y el aire. En cada periodo de medición se usó una hoja por planta elegida al azar. Los valores de asimilación neta diaria de CO_2 se obtuvieron integrando las tasas instantáneas de asimilación en 24 h.

En cada fecha de medición se registró cada hora el flujo fotosintético de fotones (FFF; longitudes de onda de 400-700 nm), desde la salida hasta la puesta del sol, con un sensor cuántico Li-Cor 190S (Li-Cor, Lincoln, NE, EE.UU). También se registró cada hora la temperatura del aire durante 24 h, con un termómetro de mercurio. Para determinar el contenido de agua en el suelo, cada dos meses (septiembre de 1998 a agosto de 1999) se colectaron 10 muestras de suelo en las zonas donde se encontraban las raíces (rizosfera) de las plantas de agave azul, a una profundidad de 20 cm, en un radio no mayor a 1 m a partir de la base de la planta. Estas muestras fueron colocadas en una estufa y secadas a 80 °C por 72 h hasta que no se registraron cambios posteriores en peso. Los datos se expresaron

mean annual night temperature oscillates between 9 and 17 °C, while the average annual day temperature ranges from 21 to 27 °C. Rainfall varies from 705 to 870 mm (INEGI, 1992; Medina *et al.,* 1998). Amatitán is located in the Central region, and is the only important cultivation area of agave in this region. It is physically connected to the Tequila region forming practically one single zone of cultivation. The climate in the Central and the Tequila regions is similar to, or warmer, than that in Los Altos, and presents greater variation of altitude (470 to 2830 m, which brings about greater thermal variations. Average night temperatures vary between 11 and 22 °C, with an average of 17 °C; during the day, temperatures, oscillate from 22 to 32 °C, with a an average of 27 °C. The accumulated rainfall varies from 830 to 1050 mm (INEGI, 1992; Medina *et al.,* 1998).

Ecophysiological study

This study was conducted from September 1998 to August 1999, at two commercial plantations of agave azul (*Agave tequilana* Weber var. azul) in Jalisco, México. One plantation was located in Amatitán (AMAJ) at 20° 42' 30" N, 103° 37' 40" W, and 1310 m, which is technically classified as a zone of warm subtropical climate (Medina *et al*., 1998). The other plantation was located in Arandas (ARAJ) at 20° 36'30" N, 102° 00' 45" W, and 2000 m, having a temperate subtropical climate (Medina *et al*., 1998). In each plantation, a plot of 50 five year-old plants was selected. On each measurement date, 10 plants were randomly chosen of each plot for the determinations of net CO_2 uptake every two h, over a 24-h period. Six photosynthetic measurements were made in each plantation (September 1998; November 1998; January 1999; March 1999; June 1999; and August 1999). A Li-Cor LI-6200 (Li-Cor, Lincoln, NE, EEUU) portable photosynthetic device was used to measure photosynthesis, whose leaf chamber (250 cm^3) was modified to facilitate gas exchange measurements in the laminar succulent leaves of *A. tequilana*. This modification required the replacement of the semicilindric cover, leaving the part of the chamber resembling a prism with rectangular base, that was covered with a plastic mica, allowing a small rectangular opening of 6 cm^2 (2 cm x 3 cm) lined with a foam rubber gasket (Pimienta-Barrios *et al*., 2000). The narrow opening was pressed against the superior epidermis of the succulent leaves of *A. tequilana* in order to measure the instantaneous rates of net CO_2 uptake. For each date of measurement one leaf was used for each randomly chosen plant. The values of daily net CO_2 uptake were obtained by integrating the instantaneous assimilation rates over 24 h.

The photosynthetic photon flux density (PPF; wavelengths of 400-700 nm) for each measurement date was determined every hour from sunrise to sunset with a Li-Cor 190S quantum sensor (Li-Cor, Lincoln, NE, EEUU). Air temperature and soil water content were also measured. Air temperature was measured hourly for 24 h with a mercury thermometer. Every two months (September 1998 to August 1999), the soil water content was determined for 10 soil samples taken from the rizosphere at a depth of 20 cm. The samples were placed and dried in an oven at 80 °C for 72 h, until no further mass change occurred. Data were expressed as percentage of water content [100 x (fresh mass −dry mass) /dry mass] (Torres, 1984).

como porcentaje de contenido de agua [100 x (masa fresca- masa seca)/masa seca] (Torres, 1984).

Identificación de áreas con potencial térmico

La identificación de regiones con potencial térmico para *A. tequilana* requirió comparar la respuesta de la fotosíntesis a la temperatura en AMAJ y ARAJ, con las características térmicas del Estado de Jalisco mediante un sistema de información geográfica (SIG) IDRISI 4.1 (Eastman, 1993).

Con esta información se determinaron tres estratos térmicos para el cultivo de *A. tequilana*: óptimo, subóptimo y marginal, y tres variables regionalizadoras: temperatura nocturna media anual, temperatura diurna media anual y probabilidad de ocurrencia de temperaturas menores o iguales a −7 °C al menos un día durante el año. La estratificación térmica fue diseñada para localizar regiones con menor probabilidad de daños por temperaturas bajas en las plantas de *A. tequilana*, y regiones donde las temperaturas día/noche favorezcan la fotosíntesis.

Sistema de información térmica digital

Se generaron imágenes tipo raster (formato celdárico) de las variables térmicas regionalizadoras y se integraron en el SIG-IDRISI con una resolución dada por un tamaño de celda de 900x900 m (aproximadamente 81 ha). Para generar las imágenes de temperatura diurna y nocturna media anual se utilizó un programa de interpolación compilado en QBASIC, el cual toma en cuenta un modelo de elevación digital para ajustar la temperatura a la altitud y a la latitud, de acuerdo con los siguientes modelos predictivos (Medina *et al.,* 1998):

$$Tn=24.82709-0.000282AL \ (R^2=0.93) \quad (1)$$
$$Td=32.8394-0.000271AL \ (R^2=0.90)$$

donde Tn = Temperatura nocturna media anual (°C), Td = Temperatura diurna media anual (°C), A = Altitud (m) y L = Latitud.

El programa de interpolación se corrió con datos promedio anuales de temperatura diurna y nocturna de 98 estaciones climatológicas, a partir del periodo 1961-1996. Para el cálculo de la temperatura nocturna media anual se utilizó el siguiente modelo desarrollado por Villalpando (1985):

$$Tn=T-[(Tmax-Tmin)(11-To)/4(12-To) \times Sen(\pi 11-To/11+To)] \quad (2)$$

donde Tn, T, Tmax y Tmin son valores normales anuales para temperatura nocturna, temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima; To es la diferencia 12-0.5N (donde N es el fotoperiodo promedio anual) y π =3.1416. El fotoperiodo se calculó para cada estación con base en su valor latitudinal utilizando el programa SICA 2.0 (Medina y Ruiz, 1992).

La temperatura diurna media anual se estimó de manera similar, con la siguiente ecuación:

Identification of areas with thermal potential

The geographical information system (GIS) IDRISI 4.1 (Eastman, 1993) was used to identify regions with thermal potential for *A. tequilana*, and the information obtained from the photosynthetical response was compared to temperature in AMAJ and ARAJ.

This comparison allowed the definition of three thermal strata for the cultivation of *A. tequilana*: optimal, suboptimal and marginal, and three regionalization variables: average annual night temperature, average annual day temperature and the probability of occurrence of temperatures less or equal than −7 °C, at least one day during the year. The thermal stratification was instrumental in locating regions with low probability of damage for A. *tequilana* by low temperatures, and regions where day/night temperatures favor photosynthesis for this species.

Digital thermal information system

Raster images (cell format) of the thermal regionalization variables were generated, and integrated into the GIS-IDRISI, with a cell size resolution of 900x900 m (approximately 81 ha). In order to generate images for annual mean diurnal and nocturnal temperatures, a program compiled in QBASIC was used. This program utilized a digital elevation model to adjust temperature to altitude and latitude, according to the following predictive models (Medina *et al.,* 1998):

$$Tn=24.82709-0.000282AL \ (R^2=0.93) \quad (1)$$
$$Td=32.8394-0.000271AL \ (R^2=0.90)$$

where Tn = annual mean night temperature (°C), Td = annual mean day temperature (°C), A = Altitude (m) and L = Latitude.

An interpolation program with average annual data of diurnal and nocturnal temperatures was performed (from 1961 to 1996), using data from 98 weather stations. For calculations of annual mean nocturnal temperature, the following model, reported by Villalpando (1985), was used:

$$Tn=T-[(Tmax-Tmin)(11-To)/4(12-To) \times Sen(\pi 11-To/11+To)] \quad (2)$$

where Tn, T, Tmax and Tmin are annual normal values for night temperature, average temperatures, maximum temperature and minimum temperature respectively; To is the difference 12-0.5N (where N is the annual average photoperiod), and π = 3.1416. The photoperiod was calculated for each weather station, based on the latitudinal value, using the software SICA 2.0 (Medina and Ruiz, 1992).

Mean annual day temperature was estimated in a similar manner with the following equation:

$$Td=T+[(Tmax-Tmin)(11-To)/4(12-To) \times Sen(\pi 11-To/11+To)] \quad (3)$$

$$Td=T+[(Tmax-Tmin)(11-To)/4(12-To) \times Sen(\pi 11-To/11+To)] \quad (3)$$

donde Td es la temperatura diurna media anual.

Además, para cada una de las 98 estaciones climatológicas se calculó la probabilidad de ocurrencia de por lo menos un día con temperatura menor o igual a −7 °C, dividiendo el número de años con ocurrencia de heladas entre el número total de años, a partir de la serie 1961-1996. Esta información se usó para construir una matriz de datos georreferenciados para alimentar el procedimiento de interpolación del SIG-IDRISI (Eastman, 1993).

Para localizar las zonas óptimas, subóptimas y marginales para *A. tequilana*, las imágenes de las variables regionalizadoras fueron reclasificadas en el SIG-IDRISI de acuerdo con el esquema de estratificación térmica, para luego ser sobrepuestas.

Finalmente, se calculó la superficie correspondiente a las áreas potenciales para *A. tequilana* y se realizó un análisis espacial para identificar los tipos climáticos y el rango altitudinal correspondiente a las zonas térmicas óptimas. Para ello se utilizó una imagen de los climas de la República Mexicana (Medina *et al.,* 1998) y un modelo de elevación digital (INEGI, 1992).

Resultados y Discusión

Ecofisiología

Las observaciones en las dos localidades revelaron, en ambas, una amplia variación en las temperaturas promedio día/noche en las fechas en que se midió la fotosíntesis. En ARAJ, en enero de 1999, se registró el promedio más bajo de temperaturas del aire día/noche (23/7 °C), y el promedio más alto fue en agosto de 1999 (25/18 °C) (Cuadro 1). En AMAJ los promedios más altos de temperatura del aire día/noche se registraron en junio (30/22 °C) y agosto de 1999 (29/21 °C) y los promedios más bajos en enero de 1999 (26/12 °C) (Cuadro 2). El promedio de las temperaturas

where Td is the mean annual day temperature.

The probability of occurrence of at least one day with temperature equal or less to −7 °C was calculated for the 98 weather stations, dividing the number of years with frost by the total number of years from the series 1961-1996 on. With this information a geo-referenced data matrix was built to feed the interpolation process for GIS-IDRISI (Eastman, 1993).

To locate the optimal, suboptimal and marginal zones for *A. tequilana*, images of regionalization variables were reclassified in the GIS-DRISI according to the thermal stratification scheme, and then overlaid.

Finally the surface of the regions representing potential cultivation areas for *A. tequilana* was calculated. Additionally, a spatial analysis designed to identify climatic types and altitudinal interval corresponding to optimal thermal zones was realized. For this purpose, an image of climatic types of México (Medina *et al.,* 1998) and a digital elevation model (INEGI, 1992) were used.

Results and Discussion

Ecophysiology

The observations realized in both AMAJ and ARAJ revealed an ample variation in the average of day/night temperatures on the dates photosynthetic measurements were made. At ARAJ, the lowest average of day/night air temperature (23/7 °C) was recorded in January 1999, and the highest average of day/night temperature in August 1999 (25/18 °C) (Table 1). At AMAJ, the highest average of day/night air temperature was registered in June (30/22 °C) and August 1999 (29/21 °C), and the lowest average of day/ night air temperature in January 1999 (26/12 °C) (Table 2). The average day/night temperature from September 1998 to August 1999 was 28/19 °C at AMAJ and 23/14 °C for ARAJ.

The soil water content was greater at ARAJ than at AMAJ, varying between 24% in November 1998 and

Cuadro 1. Relaciones entre variables ambientales, tasas máximas instantáneas de asimilación de CO_2 y de asimilación neta diaria de CO_2 en *Agave tequilana*, en Arandas, Jalisco.

Table 1. Relations between environmental variables, maximal rates of instantaneous net of CO_2, and total daily net CO_2 uptake for *Agave tequilana*, at Arandas, Jalisco.

Fecha	Promedio diario del FFF (μmol m^{-2} s^{-1})	Temperatura promedio día/noche (°C)	Humedad del suelo (%)	Tasa máxima de asimilación CO_2 (μmol m^{-2} s^{-1})	Asimilación neta diaria de CO_2 (mmol m^{-2} d^{-1})
Septiembre, 1998	512	22/16	23	22a†	763a
Noviembre, 1998	583	23/15	24	12b	419bc
Enero, 1999	1045	23/7	14	11b	416bc
Marzo, 1999	1337	25/14	12	23a	572ab
Junio, 1999	555	20/16	16	11b	280c
Agosto, 1999	1288	25/18	18	10b	188c

† Datos con letra distinta, en la misma columna, son estadísticamente diferentes (DMS, p=0.05) ❖ Data with different letters in the same column are statistically different (DMS, p=0.05).

FFF = Flujo fotosintético de fotones ❖ PPF= Photosynthetic photon flux.

día/noche de septiembre de 1998 a agosto de 1999 fue 28/19 ºC en AMAJ y 23/14 ºC en ARAJ.

El contenido de agua en suelo fue superior en ARAJ y varió de 12% en marzo de 1999 a 24% en noviembre de 1998, en comparación con AMAJ que varió de 7% en marzo de 1999 a 21% en septiembre de 1998 (Cuadros 1 y 2). En ambas localidades los valores más bajos de FFF se registraron durante el verano y se incrementaron gradualmente durante el otoño e invierno, registrándose los valores más altos (superiores a 1000 μmol m^{-2} s^{-1}) al final del invierno y durante la primavera (Cuadros 1 y 2).

La asimilación neta diaria de CO_2, obtenida al integrar las tasas instantáneas de asimilación de CO_2 en 24 h, mostró tendencias diferentes en AMAJ y ARAJ (Cuadros 1 y 2). En ARAJ el valor más alto de asimilación neta diaria de CO_2 se registró en septiembre de 1998 (763 mmol m^{-2} d^{-1}), disminuyó en noviembre de 1998 y enero de 1999, aumentó en marzo de 1999 (572 mmol m^{-2} d^{-1}) y bajó en junio de 1999 y agosto de 1999 (Cuadro 1). La asimilación neta diaria de CO_2 en AMAJ fue baja al final del verano (141 mmol m^{-2} d^{-1}), se incrementó gradualmente y alcanzó el valor más alto en marzo de 1999 (921 mmol m^{-2} d^{-1}), y disminuyó en junio de 1999 y agosto de 1999 (Cuadro 2).

Los valores más altos de asimilación neta diaria de CO_2 en enero de 1999 y marzo de 1999 en AMAJ, y septiembre de 1998, y marzo de 1999 en ARAJ, coinciden con las temperaturas promedio día/noche, que varían de 22 a 26 ºC en el día y de 12 a 16 ºC durante la noche, condición que favoreció periodos prolongados de asimilación y altas tasas de asimilación instantánea (Cuadros 1 y 2). En plantas MAC, las temperaturas cálidas reducen la actividad fotosintética e incrementan la respiración (Pimienta-Barrios *et al*., 2000). Las temperaturas frescas en la noche favorecen la actividad de la enzima fosfoenol piruvato carboxilasa (PEPCasa), y la asimilación nocturna en condiciones controladas (Israel

12% in March 1999. In AMAJ, the percentages of soil water content varied from 21% in September 1998 to 7% in March 1999 (Tables 1 and 2). At both ARAJ and AMAJ, the lowest values of PPF were registered during the summer, and these values increased during the autumn and winter, the highest values of PPF (superior to 1000 μmol m^{-2} s^{-1}) being recorded at the end of the winter and during the spring (Tables 1 and 2).

The total daily net CO_2 uptake obtained by integrating the instantaneous rates over 24 h periods, revealed different tendencies at AMAJ and ARAJ (Tables 1 and 2). At ARAJ the highest value of total daily net CO_2 uptake occurred in September 1998 (763 mmol m^{-2}d^{-1}), decreasing in November 1998 and January 1999, increased again in March 1999 (572 mmol m^{-2} d^{-1}), and decreased again in June and August 1999 (Table 1). In contrast, at AMAJ, the total daily net CO_2 uptake was low at the end of the summer (141 mmol m^{-2} d^{-1}), then it increased gradually, reaching the highest value in March 1999 (921 mmol m^{-2} d^{-1}), decreasing in June 1999 and August 1999 (Table 2).

The highest values of total daily net CO_2 uptake occurred in January 1999 and March 1999 at AMAJ, and September 1998 and March 1999 at ARAJ, coinciding with average day/night air temperatures ranging from 22 to 26 ºC in the daytime, and from 12 to 16 ºC at night. These temperatures favored large periods of assimilation and highest instantaneous rates of net CO_2 uptake (Tables 1 and 2). Commonly, warm temperatures reduce the photosynthetic activity and increase the use of reserves for respiration by CAM plants (Pimienta-Barrios *et al*., 2000). Fresh air temperatures during the night favor enzyme PEPCase activity, and nocturnal assimilation by CAM plants under controlled conditions (Israel y Nobel, 1995; Nobel, 1988; Nobel *et al*., 1998), and in the field (Hascom y Ting, 1978; Pimienta-Barrios *et al*., 2000).

Night temperatures are more important than day temperatures for CO_2 uptake for *A. tequilana*. This

Cuadro 2. Relaciones entre variables ambientales, tasas máximas instantáneas de asimilación de CO_2, y de asimilación neta diaria de CO_2 en *Agave tequilana*, en Amatitán, Jalisco.

Table 2. Relations between environmental variable, maximal rates of instantaneous net CO_2 uptake, and total daily net CO_2 uptake for *Agave tequilana* at Amatitán, Jalisco.

Fecha	Promedio diario del FFF (μmol m^{-2} s^{-1})	Temperatura promedio día/noche (°C)	Humedad del suelo (%)	Tasa máxima de asimilación CO_2 (μmol m^{-2} s^{-1})	Asimilación neta diaria de CO_2 (mmol m^{-2} d^{-1})
Septiembre, 1998	999	28/21	21	8c†	141c
Noviembre, 1998	580	27/19	14	13bc	376bc
Enero, 1999	882	26/12	8	14b	578ab
Marzo, 1999	1250	26/16	7	22a	921a
Junio, 1999	1343	30/22	11	12bc	362bc
Agosto, 1999	1368	29/21	20	10c	483bc

† Datos con letra distinta, en la misma columna, son estadísticamente diferentes (DMS, p=0.05) ❖ Data with different letters in the same column are statistically different (DMS, p=0.05).

FFF = Flujo fotosintético de fotones ❖ PPF= Photosynthetic photon flux.

y Nobel, 1995; Nobel, 1988; Nobel *et al*., 1998), y en campo (Hascom y Ting, 1978; Pimienta-Barrios *et al*., 2000).

Las temperaturas nocturnas son más importantes que las diurnas para la asimilación de CO_2 en *A. tequilana*. Esto fue evidente durante el registro de la asimilación de CO_2 de septiembre 1998 a marzo de 1999 en AMAJ. En este periodo, el incremento gradual en la asimilación de CO_2 alcanzó su valor máximo en marzo de 1999, acompañado de una reducción gradual de 5 °C en la temperatura nocturna desde septiembre de 1998 hasta marzo de 1999 (Cuadro 2). Además, las temperaturas promedio durante el día cambiaron ligeramente, con una reducción de 2 °C de septiembre de 1998 a marzo de 1999. Las tasas instantáneas más altas de asimilación neta de CO_2 se registraron entre 10 °C y 18 °C, y las tasas disminuyen conforme las temperaturas son inferiores a 5 °C o superiores 23 °C (Figura 1).

En ambas localidades se mantuvo la ganancia de carbono durante el invierno, aunque la humedad en el suelo fue baja. Las ganancias de carbono durante el periodo seco en plantas MAC como los agaves, nopales y pitayos, se atribuye a la suculencia de sus órganos fotosintéticos, que les permiten mantener turgente el tejido durante periodos de baja disponibilidad de agua (Gibson y Nobel, 1986; Nobel, 1994; Pimienta-Barrios *et al*., 2000). De igual forma, la suculencia de las hojas de *A. tequilana* permitió obtener ganancias de carbono durante los meses secos, lo que fue favorecido por temperaturas frescas durante día/noche (Cuadros 1 y 2). Esta respuesta fue más evidente en la localidad AMAJ, donde hubo ganancia neta de carbono en *A. tequilana* en enero y marzo con una humedad del suelo inferior a 10%. De esta manera, *A. tequilana* puede capturar y

response was evident during the measurements of net CO_2 uptake from September 1998 to March 1999 at AMAJ. During this period, it was found that the gradual increases in the values of daily net CO_2 uptake reached their highest values in March 1999. They paralleled the decrease of 5 °C in night air temperature from September 1998 to March 1999 (Table 2). On the other hand, the average diurnal temperatures showed a slight decrease of 2 °C from September 1998 to March 1999. The highest rates of instantaneous net CO_2 uptakes occurred from 10 °C to 18 °C, the rates decreased at temperatures inferior to 5 °C or superior to 23 °C (Figure 1).

At both AMAJ and ARAJ carbon gain was extended and maintained during the winter, though soil water content was low. The gain of carbon during the dry season in CAM plants such as agaves, nopales and pitayos, is attributed to the succulence of their photosynthetic organs, that maintain the turgescence in the photosynthetic tissue during periods of low water availability (Gibson and Nobel, 1986; Nobel, 1994; Pimienta-Barrios *et al*., 2000). Likewise, the succulence of A. *tequilana* leaves allowed carbon gain during dry months, a process favored by the fresh day/night temperature prevailing during these months (Tables 1 and 2). This response was more evident at AMAJ than at ARAJ, since carbon gain by *A. tequilana* occurs in January and March, soil moisture being inferior to 10%. In this way, *A. tequilana* plants could capture and store energy to maintain their physiological functions during the spring, the driest season of the year (Pimienta-Barrios *et al*., 2001).

Light (PPF) is an environmental factor that limits photosynthesis of CAM plants (Gibson and Nobel, 1986), as is exemplified in *O. ficus-indica* and *S. queretaroensis*.

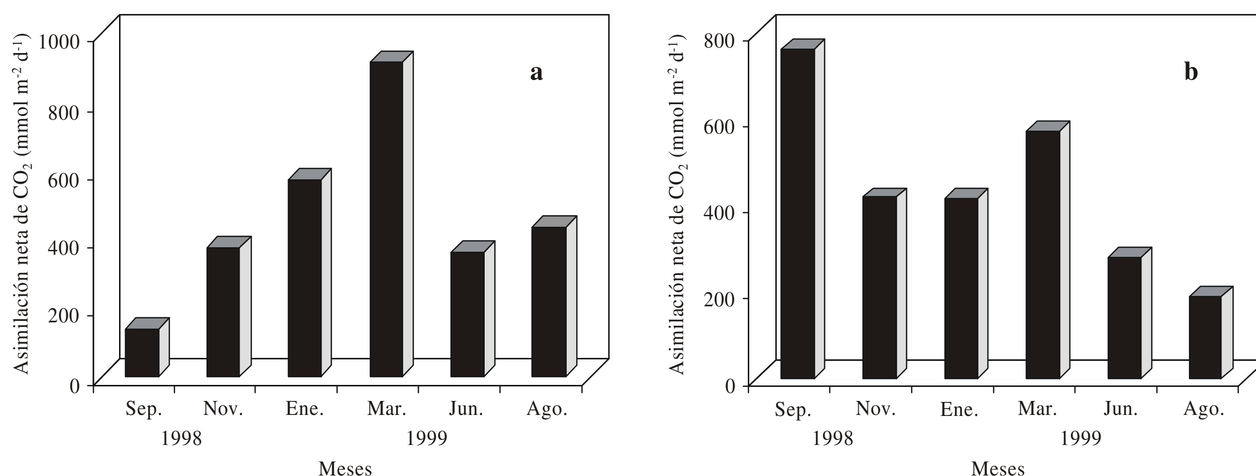


Figura 1. Asimilación neta de CO_2 durante 24 h en *Agave tequilana* en las localidades de Amatitán (a) y Arandas (b), Jalisco; en los meses de septiembre y noviembre de 1998; y enero, marzo, junio y agosto de 1999.

Figure 1. Net CO_2 uptake during 24 h in *Agave tequilana* in the localities of Amatitán (a) and Arandas (b), Jalisco; during the months of September, November 1998; and January, March, June, and August 1999.

retener energía para mantener sus funciones fisiológicas básicas durante la primavera, la estación más seca del año (Pimienta-Barrios *et al*., 2001).

La luz (FFF) es un factor ambiental limitante para la fotosíntesis en plantas MAC (Gibson y Nobel, 1986). En *O. ficus-indica* y *S. queretaroensis* la actividad fotosintética presenta una estrecha dependencia con la disponibilidad de luz (Nobel y Hartsock, 1984; Nobel y Pimienta-Barrios, 1995; Pimienta-Barrios y Nobel, 1998). Sin embargo, la evaluación estacional de la actividad fotosintética de *A. tequilana* en ARAJ reveló que el valor más alto de fotosíntesis se obtuvo en septiembre de 1998, el mes con el promedio diario más bajo de FFF y con temperaturas promedio día/noche frescas (22/16 ºC) (Cuadro 1). En AMAJ y ARAJ, los valores más altos de asimilación neta de CO_2 se registraron durante el invierno, en AMAJ a la mitad de la estación seca (marzo), cuando el contenido de agua del suelo fue bajo. Por otro lado, cuando el contenido de agua en el suelo fue alto al final del verano (septiembre), la asimilación neta diaria de CO_2 fue más baja en AMAJ que en ARAJ. La principal diferencia ambiental fue el promedio de la temperatura nocturna, que fue moderada en ARAJ (16 ºC) y más cálida en AMAJ (21 ºC).

Identificación de áreas con potencial térmico para agave

La respuesta fotosintética estacional de *A. tequilana* a las temperaturas registradas en AMAJ y ARAJ y lo reportado por Nobel *et al*. (1998) se emplearon para elaborar la estratificación térmica (Cuadro 3), la cual se enfoca a la evasión de riesgos ligados a la ocurrencia de heladas y a la localización de zonas con temperaturas diurnas y nocturnas frescas que favorezcan la fotosíntesis en *A. tequilana.*

Las Figuras 2a, b y c presentan la distribución geográfica de los estratos térmicos óptimos (Cuadro 3) para las variables estudiadas. En la Figura 2a se describen las áreas sin riesgo de heladas o de ocurrencia de temperaturas ≤ –7 ºC, que constituyen cerca de 82% de la superficie de Jalisco (6 567 885 ha). Las áreas con una alta probabilidad de riesgo de heladas se localizan en áreas del norte,

In these species the photosynthetic activity has a close relation with light availability (Nobel and Hartsock, 1984; Nobel and Pimienta-Barrios, 1995; Pimienta-Barrios and Nobel, 1998). Nevertheless, the seasonal evaluation of the photosynthetic activity for *A. tequilana* at ARAJ revealed that the highest photosynthetic values occurred in September 1998, month characterized by the lowest average value of PPF, and fresh average day/night temperature (22/16 ºC) (Table 1). At both AMAJ and ARAJ, high values of total daily net CO_2 uptake occurred in the winter, in the middle of the dry season (March), when the soil water content was low. On the other hand, when the soil water content was high, as occurs immediately after the summer rainy season (September), daily net CO_2 uptake was lower in AMAJ than in ARAJ. The main environmental difference was that average night temperature was moderate at ARAJ (16 °C) but warmer at AMAJ (21 ºC).

Identification of areas with thermal potential for agave

The seasonal photosynthetic response of *A. tequilana* to temperatures registered in AMAJ and ARAJ, and data reported by Nobel *et al*. (1998), were employed to construct thermal stratification data (Table 3), used to locate areas free from risks of frost occurrence, and regions with fresh day/night temperatures that favor photosynthesis in *A. tequilana.*

Figures 2a, b and c represent the geographical distribution of the optimal thermal strata described in Table 3 for the variables under study. Figure 2a shows the areas free from the risk of frost, and the occurrence of ≤ –7ºC temperatures, which constitute almost 82% of the surface of Jalisco (6 567 885 ha). Areas with a high probability of frost risk are located in the northern, northeastern and southern zones of the State, where frost damages are registered, that vary from 10 to 12% of the cultivated land (CRT, 2000). Notwithstanding this adverse environmental condition, in the northeastern part of Jalisco we have one of the most important regions for agave cultivation (Los Altos de Jalisco). Other marginal regions for agave cultivation are located in the coastal

Cuadro 3. Intervalos térmicos diurnos y nocturnos, y umbrales de temperatura baja para definir las condiciones óptimas, subóptimas y marginales para el cultivo de *Agave tequilana* en Jalisco.

Table 3. Diurnal and nocturnal ranges, and low temperature thresholds, used to determine optimal, suboptimal and marginal conditions for the cultivation of *Agave tequilana* in Jalisco.

Variable	Condición		
	Óptima	Subóptima	Marginal
Temperatura nocturna (ºC)	10 a 16	5 a 10 ó 16 a 25	< 5 ó > 25
Temperatura diurna (ºC)	15 a 25	10 a 15 ó 25 a 35	< 10 ó > 35
Probabilidad de heladas	< 0.10	———	> 0.10

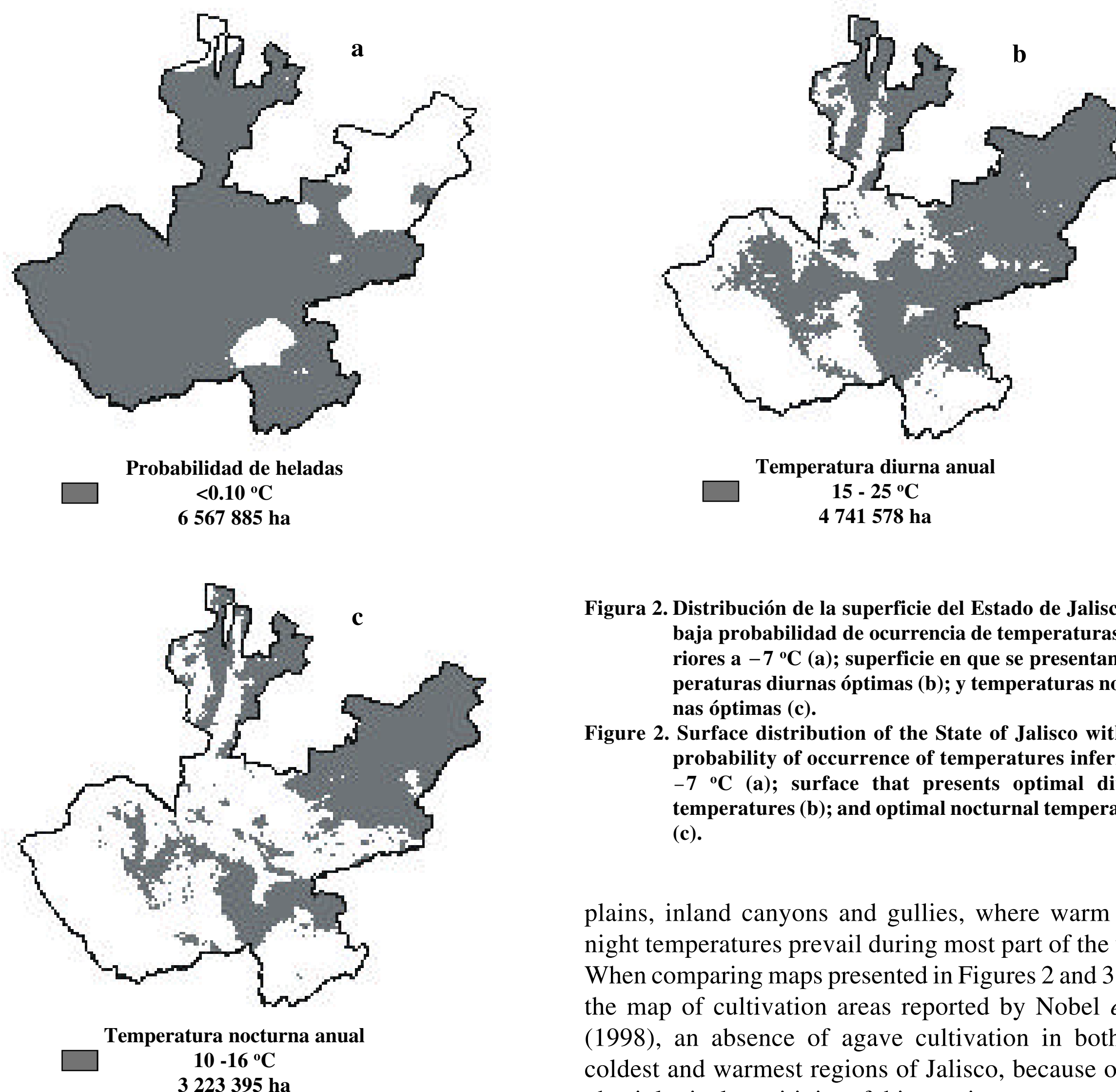


Figura 2. Distribución de la superficie del Estado de Jalisco con baja probabilidad de ocurrencia de temperaturas inferiores a −7 °C (a); superficie en que se presentan temperaturas diurnas óptimas (b); y temperaturas nocturnas óptimas (c).

Figure 2. Surface distribution of the State of Jalisco with low probability of occurrence of temperatures inferior to −7 °C (a); surface that presents optimal diurnal temperatures (b); and optimal nocturnal temperatures (c).

noreste y sur de Jalisco, donde se han registrado daños por heladas que oscilan de 10 a 12% de la superficie cultivada (CRT, 2000). No obstante esta condición, en el noreste del Estado se localiza una de las regiones más importantes (Los Altos de Jalisco) del cultivo de agave. Otras regiones marginales para el cultivo de esta especie se ubican en las planicies costeras, cañones y barrancas donde prevalecen temperaturas cálidas día/noche la mayor parte del año. Al comparar los mapas de las Figuras 2 y 3 con el mapa de áreas de cultivo reportado por Nobel *et al.* (1998), se encontró la ausencia del cultivo en las regiones más frías y cálidas de Jalisco, lo cual se debe a que esta especie es sensitiva a temperaturas menores de −7 °C, y a las temperaturas altas (35 °C) (Nobel *et al.,* 1998).

Las áreas con temperaturas promedio diurnas óptimas para la fotosíntesis (15-25 °C) suman 4 741 578 ha, que corresponden a 58% de la superficie del Estado (Figura 2b). Sin embargo, la condición óptima de temperatura nocturna

plains, inland canyons and gullies, where warm day/ night temperatures prevail during most part of the year. When comparing maps presented in Figures 2 and 3 with the map of cultivation areas reported by Nobel *et al.* (1998), an absence of agave cultivation in both the coldest and warmest regions of Jalisco, because of the physiological sensitivity of this species to temperatures inferior to −7 °C, and higher than 35 °C (Nobel *et al.,* 1998).

Areas with optimal average diurnal temperatures for photosynthesis (15-25 °C) form a total of 4 741 578 ha, corresponding to 58% of the total surface of the State (Figure 2b). However, regions possessing optimal nocturnal temperature (10-16 °C) cover only 36% of the said surface, which corresponds to 3 223 395 ha (Figure 2c). From this data it is concluded that night temperature is the dominant climatic variable imposing the main restrictions in any attempt to increase the cultivated land for *A. tequilana*. Figure 2 shows that areas with optimal diurnal and nocturnal temperatures coincide in the largest part of the state (Figures 2b and 2c), conditions that favor the possibility of cultivation of A. *tequilana* in the State.

Figure 3 shows a map that describes the distribution of optimal, suboptimal and marginal areas for agave cultivation in Jalisco. This map was obtained by

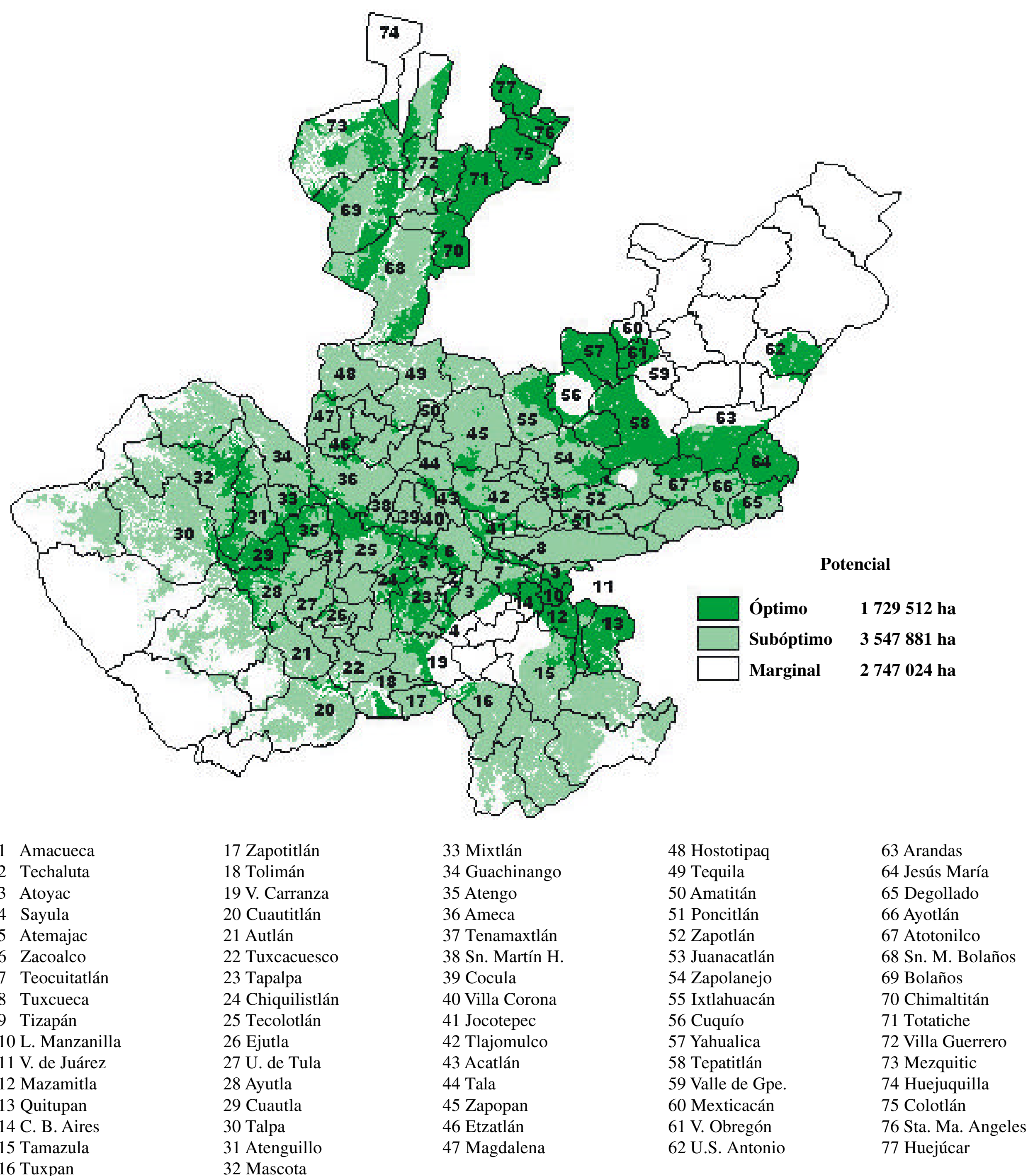


Figura 3. Distribución espacial y superficie (ha) correspondiente a las áreas óptimas, subóptimas y marginales para el cultivo de *Agave tequilana*.

Figure 3. Spatial distribution and surface (ha) that corresponds to optimal, suboptimal and marginal areas for the cultivation of *Agave tequilana*.

(10-16 ºC) sólo cubre 36% de la superficie estatal, ésto es 3 223 395 ha (Figura 2c); entonces, la temperatura nocturna es la variable climática más restrictiva para la expansión del cultivo de *A. tequilana*. En la Figura 2 se observa que las áreas óptimas de temperatura diurna y nocturna coinciden

overlaying the thermal maps of Figures 2a-c using algebraic procedures of GIS-IDRISI. Both optimal and suboptimal areas are free from frost risk, however they differ in the degree to which diurnal/nocturnal thermal regime favors carbon uptake during the year.

en la mayor parte del Estado (Figuras 2b y 2c), lo cual favorece el cultivo de *A. tequilana* en el Estado.

En la Figura 3 se presenta la distribución de las áreas óptimas, subóptimas y marginales para el cultivo de agave en Jalisco. Este mapa se obtuvo sobreponiendo los mapas térmicos de las Figuras 2a-c, mediante procedimientos de álgebra de mapas del SIG-IDRISI. Las áreas óptimas y subóptimas tienen en común el estar a salvo del riesgo de daño por heladas, pero difieren en el grado en que su régimen térmico diurno/nocturno favorece la asimilación de carbono durante el año.

Las áreas óptimas se distribuyen principalmente en el noreste, norte y centro del Estado, más un cinturón que va del este a oeste, con excepción de los municipios costeros. En la región noreste, las áreas óptimas se localizan en los municipios de Acatic, Arandas, Atotonilco, Ayotlán, Degollado, Jesús María, Tepatitlán, Unión de San Antonio, Villa Obregón, Yahualica, coincidiendo con los reportados por Flores *et al.* (1998), a excepción de los municipios de Yahualica, Villa Obregón y Unión de San Antonio, mencionados por estos autores como subóptimos. En la región norte las áreas óptimas se distribuyen en los municipios de Bolaños, Colotlán, Chimaltitán, Huejúcar, Huejuquilla, Mezquitic, San Martín de Bolaños, Santa María de Los Angeles, Totatiche y Villa Guerrero, lo cual coincide con lo señalado por Ruiz *et al.* (1998a). Sin embargo, el estudio de estos autores sobrestimó la superficie correspondiente al potencial óptimo, principalmente en los municipios de Huejuquilla y Mezquitic, porque no consideraron los riesgos de daño por heladas. Para la región central, las áreas óptimas se concentran en los municipios de Cuquío, Ixtlahuacán del Río, Magdalena, Tala, Tlajomulco, Zapopan, Zapotlán y Zapotlanejo, lo cual coincide con lo observado por Ruiz *et al.* (1997; 1998b), pero difieren en cuanto a la superficie correspondiente a las áreas óptimas. Dichos autores sobrestimaron la superficie óptima porque no consideraron el efecto de las altas temperaturas sobre la asimilación de CO_2 en *A. tequilana*, lo cual fue documentado por Nobel *et al.* (1998), en condiciones controladas y confirmada en este trabajo en condiciones de campo.

Otras áreas óptimas importantes en el estado de Jalisco se distribuyen como un cinturón de este a oeste, con mayor superficie en los municipios de Mascota y Quitupan, incluyendo Amacueca, Atemajac de Brizuela, Atengo, Atenguillo, Atoyac, Chiquilistlán, Concepción de Buenos Aires, Cuautla, Jocotepec La Manzanilla, Mazamitla, Mixtlán, Sayula, Tapalpa, Techaluta, Tecolotlán, Teocuitatlán, Tizapán el Alto, Valle de Juárez, Venustiano Carranza y Zacoalco.

Las áreas subóptimas se distribuyen en casi todo el estado de Jalisco, con excepción de algunas zonas en el noreste, norte, costa y sur del Estado, donde alternan zonas óptimas con marginales (Figura 3).

Optimal areas are distributed mainly in the northeast, north and central regions of the state, plus an optimal belt zone, that goes from east to west, with the exception of the coastal municipalities. In the northeastern region, optimal areas are located in the municipalities of Acatic, Arandas, Atotonilco, Ayotlán, Degollado, Jesús María, Tepatitlán, Unión de San Antonio, Villa Obregón and Yahualica. These areas coincide with those reported by Flores *et al.* (1998), with the exception of Yahualica, Villa Obregón and Unión de San Antonio, mentioned by the same authors as sub-optimal regions. In the northern region, optimal areas were found in the municipalities of Bolaños, Colotlán, Chimaltitán, Huejucar, Huejuquilla, Mezquitic, San Martín de Bolaños, Santa María de Los Angeles, Totatiche and Villa Guerrero. These areas coincide with data previously provided by Ruiz *et al.* (1998a). However, the study of these authors overestimated the surface corresponding to optimal potential mainly at the municipalities of Huejuquilla and Mezquitic, since they did not take into account the risks of frost damage. For the central region, optimal areas are concentrated in the municipalities of Cuquío, Ixtlahuacán del Río, Magdalena, Tala, Tlajomulco, Zapopan, Zapotlán and Zapotlanejo, which coincides with data reported by Ruiz *et al.* (1997; 1998b), but differ in regard to the area considered as optimal. These authors overestimated such surface area since they did not consider the effects of high temperatures on CO_2 uptake for *A. tequilana*, previously documented by Nobel *et al.* (1998) under controlled conditions and confirmed in this study under field conditions.

Other optimal areas in Jalisco include a belt that extends in an east-west direction, most of the surface being occupied by the municipalities of Mascota and Quitupan, and including the municipalities of Amacueca, Atemajac de Brizuela, Atengo, Atenguillo, Atoyac, Chiquilistlán, Concepción de Buenos Aires, Cuautla, Jocotepec, La Manzanilla, Mazamitla, Mixtlán, Sayula, Tapalpa, Techaluta, Tecolotlán, Teocuitatlán, Tizapán el Alto, Valle de Juárez, Venustiano Carranza and Zacoalco.

Sub-optimal areas are distributed across the majority of the state surface, except some zones in the northeast, northern, coastal and southern regions of the state, where optimal and marginal areas alternate (Figure 3).

It is remarkable the presence of optimal zones in some northern and central-southern areas of the state (Figure 3) where *A. tequilana* is not a usual crop. These regions include a compact area, formed by the municipalities of Colotlán, Chimaltitán, Huejucar, Santa María de Los Angeles and Totatiche. In this area, the cultivation of *A. tequilana* could be an important option for future regional development. A similar situation exists in the southeastern region of the state, which is composed of optimal areas including the municipalities of Concepción de Buenos

Es importante la existencia de zonas óptimas (Figura 3) en las cuales *A. tequilana* no es un cultivo típico, como algunas áreas de la zona norte y la centro-sur del Estado. Dentro de estas regiones la parte oriental de la zona norte constituye una área compacta bien definida, conformada por los municipios de Colotlán, Chimaltitán, Huejúcar, Santa María de Los Angeles y Totatiche. Para esta área, el cultivo *A. tequilana* podría representar una opción para el desarrollo regional. Un caso similar es la zona en el sureste del Estado, compuesta por las áreas óptimas de los municipios de Concepción de Buenos Aires, La Manzanilla, Mazamitla, Quitupan, Teocuitatlán, Tizapán el Alto y Valle de Juárez.

Comparando la superficie actual de cultivo (Nobel *et al*., 1998) con la potencial (Figura 3), la cual integra 1 729 512 ha para la condición térmica óptima, puede concluirse que las posibilidades de cultivar exitosamente *A. tequilana* en Jalisco son amplias. Sin embargo, es conveniente considerar otros factores ambientales en el diagnóstico de áreas, como es el caso de las variables edáficas (Ruiz *et al*., 1999).

De acuerdo con la imagen digital de los tipos climáticos de la República Mexicana (Medina *et al.,* 1998), y sin considerar la humedad del suelo, las áreas óptimas para *A. tequilana* en Jalisco están distribuidas básicamente en dos tipos climáticos: subtrópico templado y subtrópico semicálido; para estos autores, subtrópico significa por lo menos un mes con temperatura media menor que 18 ºC, pero mayor que 5 ºC; templado implica una temperatura media anual entre 5 y 18 ºC y semicálido corresponde a una temperatura media anual entre 18 y 22 ºC.

Dentro de estos dos tipos climáticos, y en concordancia con el modelo de elevación digital de INEGI (1992), todas las áreas óptimas para agave están distribuidas a alturas entre 1100 y 2800 m, y 85% se ubica entre 1600 y 2200 m.

Conclusiones

La temperatura nocturna es el factor ambiental más importante en la regulación de la fotosíntesis en *A. tequilana*; debido a que los valores más altos de asimilación neta diaria de CO_2 se registraron durante el invierno en Amatitlán (AMAJ) y durante el final del verano, otoño y el invierno en Arandas (ARAJ), meses con temperaturas frescas durante la noche (12-16 ºC). Por tanto, la temperatura nocturna es la variable climática más importante para determinar las áreas en que esta especie puede lograr una mayor ganancia de carbono mediante la fotosíntesis.

Agave tequilana es una especie idónea para climas subtropicales, con régimen térmico de templado a semicálido. Dentro de estos tipos climáticos, el cultivo del agave debería establecerse entre 1600 y 2200 m, ya

Aires, La Manzanilla, Mazamitla, Quitupan, Teocuitatlán, Tizapán el Alto and Valle de Juárez.

Comparing the present surface of agave cultivation (Nobel *et al*., 1998) with the potential for the cultivation of this crop (Figure 3), which integrates an area of 1 729 512 ha of optimal thermal condition, it can be concluded that the possibilities of successfully cultivating *A. tequilana* in Jalisco are ample. It is pertinent, however, to take into consideration other environmental factors in the diagnosis of areas, such as soil variables (Ruiz *et al*., 1999).

According to the digital image of climatic types of the Mexican Republic (Medina *et al.,*1998), notwithstanding soil moisture, optimal areas for *A. tequilana* in Jalisco are distributed in two climatic types: temperate subtropics and semi warm subtropics; for these authors, subtropics was defined by at least one month with an average temperature lower than 18 ºC, but higher than 5 ºC; temperate implies an annual average temperature between 5 and 18 ºC and semi warm corresponds to an annual average temperature between 18 and 22 ºC.

Within these climatic types and according to INEGI (1992) digital elevation model, the majority of the optimal areas for agave are distributed at altitudes that vary from 1100 to 2800 m, and 85% are located between 1600 and 2200 m.

Conclusions

Nocturnal temperature is considered the most important environmental factor that regulates photosynthesis for *A. tequilana*, because the highest daily net CO_2 uptake occurred during the winter in Amatitan (AMAJ) and during the end of the summer, autumn and winter in Arandas (ARAJ), months that commonly present fresh temperatures during the night (12-16 ºC). Consequently, night temperature might be the most important climatic variable for the determination of areas in which this species might obtain the greatest values of carbon gain through photosynthesis.

Agave tequilana is an appropriate crop for subtropical climates, with thermal regimes that vary from temperate to semi-warm. Within these climatic types, the cultivation of agave should be promoted between 1600 and 2200 m, essentially because this is where optimal conditions of night temperatures prevail.

Optimal zones for agave cultivation have a surface ten times superior to the one presently cultivated. Within the optimal zones, three regions are outstanding: the northern, northeastern regions of the state of Jalisco, and a belt that spans from east to west, covering a big number of municipalities with the exception of the coastal ones.

—End of the English version—



que en ese intervalo hay condiciones óptimas en la temperatura nocturna.

Las zonas óptimas para el cultivo del agave tienen una superficie diez veces mayor que la superficie actualmente cultivada. Dentro de las zonas óptimas destacan tres regiones: norte y noreste del Estado de Jalisco, más un cinturón que va de este a oeste y que cubre un gran número de municipios, con excepción de los costeros.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada por el Programa General de Apoyo y Desarrollo Tecnológico a la Cadena Productiva Agave-Tequila, y por la Universidad de Guadalajara. Las Compañías Tequila Herradura y Tequila Cazadores ofrecieron facilidades para el trabajo de campo en sus plantaciones. A Tequila Herradura se agradece la beca proporcionada a la Biól. Julia Zañudo H. y que en gran parte hizo posible este trabajo.

Literatura Citada

Consejo Regulador del Tequila. 2000. Anuario estadístico de producción del sistema agave-tequila. Consejo Regulador del Tequila. Guadalajara, Jalisco, México. 70 p.

Eastman, J. R. 1993. IDRISI Ver. 4.1. Technical Reference. Clark University-Graduate School of Geography. Massachusetts, USA. 229 p.

Flores L., H. E., J. A. Ruiz C., K. F. Byerly, R. A. Martínez, D. R. González, L. Nava, S. De la Paz, P. Alemán. y J. J. Aceves. 1998. Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el Distrito de Desarrollo Rural de Lagos de Moreno, Jalisco. Folleto Técnico Núm. 8. INIFAP-CIRPAC-C.E. Altos de Jalisco. Tepatitlán, Jal. México. 93 p.

Flores L., H. E. 2000. Informe final del Proyecto CONACYT Análisis agroecológico del *Agave tequilana* Weber var. Azul, con énfasis en problemas fitosanitarios. INIFAP-Universidad de Guadalajara. Documento de circulación interna. Tepatitlán, Jalisco. 153 p.

Gibson, A. C., and P. S. Nobel. 1986. The Cactus Primer. Harvard University Press. Cambridge. 286 p.

Hanscom, Z., and I. P. Ting. 1978. Irrigation magnifies CAM-photosynthesis in *Opuntia basilaris* (Cactaceae). Oecologia 33: 1-15.

INEGI, 1992. Modelo de elevación digital para la República Mexicana. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Desplegable de difusión. México, D.F.

Israel, A. A., and P. S. Nobel. 1995. Growth temperature versus CO_2 uptake, Rubisco and PEPCase activities, and enzyme high temperature sensitivities for a CAM plant. Plant Physiology Biochemistry 33: 345-351.

Medina G., G. y J. A. Ruiz C. 1992. SICA 2.0: Sistema de Información para Caracterizaciones Agroclimáticas. Documentación y Manual del Usuario. Tema Didáctico No. 2. SARH-INIFAP. C. E. Zacatecas. Calera de V. R., Zacatecas. 103 p.

Medina G., G., J. A. Ruiz C. y R. A. Martínez P. 1998. Los Climas de México. Libro Técnico Núm. 1. INIFAP. Ed. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco, México. 103 p.

Nobel, P. S. 1988. Environmental Biology of Agave and Cacti. Cambridge University Press, New York, 270 p.

Nobel, P. S. 1994. Remarkable Agaves and Cacti. Cambridge University Press. New York. 166 p.

Nobel, P. S., and T. I. Hartsock. 1984. Physiological responses of *Opuntia ficus-indica* to growth temperatures. Physiologia Plantarum 60: 98-105.

Nobel, P. S., and E. Pimienta-Barrios. 1995. Monthly stem elongation for *Stenocereus queretaroensis*: relationships to environmental conditions, net CO_2, and seasonal variation in sugar content. Environmental and Experimental Botany 35: 17-42.

Nobel, P. S., M. Castañeda, G. North, E. Pimienta-Barrios, and J. A. Ruiz-Corral. 1998. Temperature influences on leaf CO_2 exchange, cell viability and cultivation range for *Agave tequilana*. J. Arid Environments 39:1-9.

Pimienta-Barrios, E., and P. S. Nobel. 1998. Vegetative, reproductive, and physiological adaptations to aridity of pitayo (*Stenocereus querataroensis)* Cactaceae. Economic Botany 52(4): 401-411.

Pimienta-Barrios, E., J. Zañudo, E. Yepez, and P. S. Nobel. 2000. Seasonal variation of net CO_2 uptake for cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) and pitayo (*Stenocereus queretaroensis*) in a semiarid environment. J. Arid Environments 44: 73-83.

Pimienta Barrios, E., C. Robles Murguía and P. S. Nobel. 2001. Net CO_2 uptake for *Agave tequilana* in a warm and a temperate environment. Biotropica. 33 (2): 312-318.

Ruiz C., J. A., H. E. Flores Ruiz C., H. E. Flores L., R. A. Martínez, P., D. R. González E. y L. Nava V. 1997. Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el Distrito de Desarrollo Rural de Zapopan, Jalisco. Folleto Técnico Núm. 5. INIFAP-CIRPAC-C.E. Centro de Jalisco. Tlajomulco de Zúñiga, Jal. México. 60 p.

Ruiz C., J. A., H. E. Flores L., R. A. Martínez, P., D. R. González E. y L. Nava V. 1998a. Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el Distrito de Desarrollo Rural de Colotlán, Jalisco. Folleto Técnico Núm. 7. INIFAP-CIRPAC-C.E. Centro de Jalisco. Tlajomulco de Zúñiga, Jal. México. 60 p.

Ruiz C., J. A., K. F. Byerly M., R. A. Martínez P., D. R. González E., L. Nava V., S. de la Paz G., P. Alemán R., J. J. Aceves R. y H. E. Flores L. 1998b. Determinación del potencial productivo de especies vegetales para el Distrito de Desarrollo Rural de Ameca, Jalisco. Folleto Técnico Núm. 6. INIFAP-CIRPAC-C.E. Centro de Jalisco. Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco México. 60 p.

Ruiz C., J. A., G. Medina G., I. J. González A., Z. Ortiz T., H. E. Flores L., R. A. Martínez P. y K. F. Byerly M. 1999. Requerimientos agroecológicos de cultivos. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP-CIRPAC. Ed. Conexión Gráfica. Guadalajara, Jalisco, México. 362 p.

Torres, E. R. 1984. Manual de Conservación de Suelos. Editorial Diana, México, D.F. 180 p.

Villalpando, J. F. 1985. Métodos de análisis en agroclimatología. Documento de circulación interna. INIA. C. E. Zapopan, Zapopan, Jalisco, México. 120 p.